Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 4, pp. 373-376, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.4.373

Original article

중성자선에 대한 붕소를 혼입한 폴리에틸렌의 차폐효과 분석

이한나[1] · 박병목[2] · 윤선영[3] · 여화연[4,*]

[1]남부대학교 방사선학과, [2]세안에너텍㈜, [3]남부대학교 방사선학과, [4]남부대학교 방사선학과

Analysis of Neutron Shielding Effect of Polyethylene Containing Boron

Han Na Lee[1], Byeong Mok Park[2], SunYoungYoon[3], and HwaYeonYeo[4,*]

[1]Department of Radiology, Nambu University, 22, Nambudae-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62271, Republic of Korea
[2]SAE-AN ENERTECH CORP., 184, Gasan Digital 2ro, Geumcheon-gu, Seoul 08501, Republic of Korea
[3]Department of Radiology, Nambu University, 22, Nambudae-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62271, Republic of Korea
[4]Department of Radiology, Nambu University, 22, Nambudae-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62271, Republic of Korea

ABSTRACT When a neutron beam passes through a medium, the intensity is attenuated through scattering and absorption reactions through interaction and collision with the nuclei of the medium. The shielding effect of the borated polyethylene shield, which uses hydrogen to shield the neutron beam and contains boron to attenuate the scattering process, was compared with that of the polyethylene shield. The experimental results showed that when shielded with a thickness of 2 and 4 cm, the shielding rate of the borated polyethylene shield was reversed to that of the polyethylene shield, and when shielded with a thickness of 4 and 6 cm or more, the shielding effect increased again. It was confirmed that there is an energy range in which the material called boron, which is effective for absorption, can perform well as a shielding material depending on the energy range of the neutron to be shielded. Therefore, if you try to shield neutrons of various energy ranges with the same material, you can consider this limitation and solve it by designing a combination of various types of materials or by using multiple shielding methods of various types of shielding.

Key words: Neutron, Boron, Polyethylene, Shielding

1. 서 론

원자력발전소는 원자로에서 인위적으로 가공한 농축 우라늄의 핵분열 연쇄반응을 제어하여 발생하는 열로 물 등을 증발시키며 수증기의 압력을 통해 전기를 생산해낸다. 원자력은 현재 국내 전력 생산의 약 30%를 차지하고 있으며, 약 25곳의 원자력 발전소가 있다[1]. 원자력 산업에서 중성자를 차폐해야 할 때, 중성자 흡수체는 중요하게 사용되는 구조체이며 사용후핵연료의 운반 및 저장 용기, 산업, 연구 분야의 장치 혹은 차폐 재료로 활용된다.

0.1 MeV 이상의 에너지를 보유한 고속중성자의 경우 중성자와 질량이 거의 같은 수소(H) 원자와 충돌할 때 에너지 손실이 최대가 되기 때문에 중성자선의 차폐에 수소(H)를 많이 활용한다[2]. 이러한 수소가 함유된 차폐체로서 상용화되어 있어 구매가 쉽고 내구성이 있는 폴리에틸렌이 있다[3].

붕소 원소의 경우 큰 중성자 흡수단면적을 갖고 있어 중성자 흡수재로 널리 알려져 사용되고 있다[4].

붕소는 1 eV 이하의 열중성자를 포획하여 다음과 같은 핵반응이 일어나며 리튬 이온과 알파 입자 및 즉발 감마선이 방출된다[5].

$$^{10}B + n \rightarrow {}^{7}Li^{*} + \alpha \rightarrow {}^{7}Li + \alpha + \gamma \ (94\%)$$
$$^{10}B + n \rightarrow {}^{7}Li^{*} + \alpha \ (6\%)$$

두 성분에 대한 차폐체에는 차이가 있으며 효과적인 차폐체를 이용하여 안전성을 확보해야 한다. 특히 경제, 시설 등의 무한한 자원이 있는 것이 아닌 제한된 자원 내에서 최대한의 방호효과를 얻기 위해서는 차폐 성능에 대한 데이터를 기반으로 적절한 차폐 설계를 계획할 수 있어야한다. 따라서 본 연구에서는 중성

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/
Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author: Hwa Yeon Yeo
Tel: +82-62-970-0157, Fax: +82-62-970-6200, E-mail: yhy@nambu.ac.kr
Received 5 November 2024 Revised 16 December 2024 Accepted 17 December 2024

자 차폐체로서 효과적인 붕소(B) 성분에 주안점을 두어 해당 원소를 폴리에틸렌에 혼합시킨 Borated Polyethylene 차폐체의 차폐효과와 Polyethylene 차폐체의 차폐효과를 에너지 범위에 따라 비교하여 알아보고자 하였다.

구체적으로 Borated Polyethylene 차폐체의 경우 0.1-1 MeV 중성자 에너지 범위에도 폴리에틸렌 차폐체보다 효과가 있어 차폐 두께를 줄일 수 있을지의 여부를 알고자 하였다. 이를 통해 제한된 차폐공간에서도 에너지 범위대에 따른 차폐순서, 배치 등의 차폐방법을 달리하여 효율성과 경제성을 높일 수 있을 것으로 기대한다. 또한 각 차폐체의 주요 성분인 수소(H), 붕소(B)에 대한 중성자의 에너지 범위에 따른 핵반응과 차폐효과 간의 상관관계를 일부 파악하고자 하였으며 붕소 원소의 흡수단면적 곡선의 이론적인 내용을 위의 차폐효과와 연계하여 알아보고자 하였다.

2. 대상 및 방법

2.1. 연구대상 및 재료

몬테카를로법은 난수를 이용하여 물리적, 수학적 방법을 확률적으로 해결하는 방법이다. 몬테카를로 방법은 제2차 세계대전의 맨해튼 프로젝트에서 처음으로 사용되어온 후로 주로 방사선의 방호, 선량 측정, 방사선 차폐, 물리학, 원자력 설계, 치료와 같은 핵의학, 입자 검출, 방사성 소스의 설계 및 분석, 방사성동위원소를 사용하는 장소에서 이들의 거동을 연구하기 위해 다양한 분야에서 활용되고 있다[6].

코딩의 일반적 형태는 Cell card 영역, Surface card 영역, Data card 영역의 세 가지 영역으로 나눌 수 있다[7]. Cell card section에는 셀의 밀도와 함께 Data card에 입력된 원자번호와 비(rate)를 Cell을 구성할 조합으로 입력된다. Surface card section에는 Cell card에서 조합될 2차원, 3차원 형태의 기하학을 제작한다. Data card section에는 중성자, 광자, 전자와 같은 문제해결 대상의 입자를 단일 및 복수 지정이 가능하다. 또한, 계산될 Tally 번호와 계산시간 또는 반복될 횟수 등이 입력이 되며 그 외에도 분산감소기법, 셀의 가중치, 에너지 범위 등 소스에 관련된 여러 변수 및 출력에 관여된 명령어들이 입력되어 계산시간이 감축되도록 한다[8].

2.2. 연구방법

PC는 Windows 10 Pro으로 프로세서는 Intel (R) Core (TM) i5-8400 CPU@2.80 GHz 2.81 GHz, 설치된 Ram은 8.00 GB (7.90 GB 사용 가능) 이다. 전산 모사에 대한 에러와 소요시간은 가장낮은 에너지 0.2 MeV 2 cm PE에서의 총 에러는 0.0004, computer time=1.58 minutes이고, 가장높은 에너지 1 MeV 10 cm PE에서의 총 에러는 0.0056, computer time=6.02 minutes였다.

Borated Polyethylene 차폐체와 Polyethylene 차폐체의 중성자 차폐 성능을 확인하기 위하여 Polyethylene과 붕소를 8% 함유한 Polyethylene Borated Polyethylene의 차폐체 밀도를 1.94 $g \cdot cm^{-3}$ m로 일정하게 하였으며 소스 선원의 형태는 등방성으로 설정하였다. Particle flux averaged over a surface: units $1/cm^2$을 적용하여 가장 최적화된 구의 표면적에서 모두 측정하기 위해 tally type 2 적용하였다. 지오메트리는 향후 실험체 제작시 제작이 용이하게 하기 위하여 사각형 구조로 설계하였다.

또한 선원, 차폐체 내부 공기 및 tally type 2 적용을 위한 최외각 지오메트리는 동일하게 적용하였으며, 차폐체 2, 4, 10 cm로 변경하였다. 전산 모사는 차폐체의 두께가 두껍지 않아 별도의 Variation reduction을 적용하지 않았다. 중성자속을 환산하는데는 ICRP 74에서 ROT 기하학에서 속중성자가 조사되었을 때의 선량환산계수로 나타내었다. 이 때 ROT 기하학은 다음과 같은 상황을 모델링한다. 첫째, 이온화 방사선 빔(중성자)이 신체의 긴 축에 직각인 방향에서 균일하게 조사된다. 둘째, 신체가 빔 주위를 회전하거나, 고정된 방사선원이 신체의 긴 축 주위를 균일하게 회전하며 조사된다. 따라서 이 기하학은 넓게 분산된 방사선원이나 환경 방사능 노출(예: 방사선 구름 또는 누출)과 같은 복합적인 상황을 근사하는 데 사용된다[9].

마지막으로, 선량값은 “방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙” 제3조(방사선관리구역) 1항, 외부방사선량률: 1주당 400 μSv로 본 논문에서는 외부피폭에 대한 내용으로 외부방사선량률에서 사용된 단위를1주의 개념으로 적용하였다.

Fig. 1은 차폐체의 각 두께에 대한 MCNP 코드 묘사도이며 A 영역은 Polyethylene, Borated Polyethylene으로 B영역은 선원과 차폐체 사이의 매질인 공기(밀도: 1.293×10^{-3} g · cm)로 차폐시설과 유사한 환경으로 구현하였다. 가장 내부는 점선원의 중성자 선원을 묘사한것이며 방사선의 방출은 등방사형태(Isotropic) 이다. 사각형은 중성자 차폐체인 PE (또는 BPE)의 정사각형 박스로 설계한 것이며 PE (또는 BPE)의 두께는 2, 4, 10 cm로 각각 달리 적용하였다.

또한 최외각의 파란 구는 tally type 2를 적용하기 위한것이며 차폐체와 최외각 구 사이의 매질은 마찬가지로 공기이다.

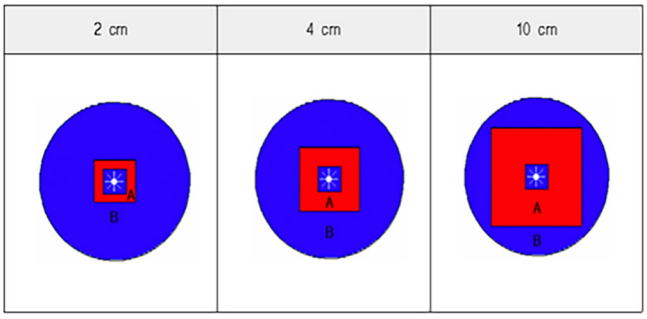

Fig. 1. MCNP code description

또한 하나는 폴리에틸렌에 붕소(boron)의 함량을 8%로 첨가하는 것으로 설정하였고 다른 하나는 단순한 폴리에틸렌으로 제작하였다.

이후 두 차폐재에 대해 소스로부터 조사되는 중성자속을 비교함으로써, 차폐효과를 비교 평가해보았다. 해당 중성자속은 Conversion Coefficient는 ICRP 74 ROT 값을 적용하여 선량률로 환산하였다.

3. 결 과

폴리에틸렌 차폐체에 조사된 중성자선의 투과 방사선량률과 붕소를 첨가한 폴리에틸렌 차폐체의 투과된 방사선량률의 결과를 에너지의 변화에 따라 비교하였다. 해당 결과는 Table 1에 나타내었으며, 최종적으로 전체 에너지 준위별 비교 결과를 Fig. 2의 그래프로 나타내었다.

중성자의 에너지가 0.2 MeV인 경우, 두께의 증가에 따라 Borated Polyethylene 차폐체의 투과 방사선량률이 Polyethylene 차폐체보다 일관되게 더 낮은 경향을 보였다. 또한, 두 차폐체의 차폐율의 차이가 비교적 큰 편이다. 중성자의 에너지가 0.4 MeV인 경우의 결과를 비교하였을 때, 0.2 MeV 에너지의 차폐율 그래프 비교와 마찬가지로 Borated Polyethylene 차폐체의 투과 방사선량률이 Polyethylene 차폐체보다 일관되게 더 낮은 경향을 보였지만, 에너지가 증가함에 따라 그 차이 폭은 근소해졌다.

Table1. Radiation dose rate after shielding for 0.2~1.0 MeV neutron beam

Polyethylene (mSv/week)					
Energy (MeV)	2 (cm)	4 (cm)	6 (cm)	8 (cm)	10 (cm)
0.2	1.412 E-02	3.058 E-03	8.279 E-04	2.303 E-04	6.453 E-05
0.4	3.058 E-02	5.154 E-03	1.160 E-03	3.022 E-04	8.355 E-05
0.6	5.087 E-02	9.293 E-03	1.891 E-03	4.406 E-04	1.140 E-04
0.8	7.297 E-02	1.547 E-02	3.237 E-03	7.287 E-04	1.740 E-04
1.0	9.362 E-02	2.308 E-02	5.313 E-03	1.235 E-03	2.956 E-04
Borated Polyethylene (mSv/week)					
Energy (MeV)	2 (cm)	4 (cm)	6 (cm)	8 (cm)	10 (cm)
0.2	1.073 E-02	6.815 E-04	3.230 E-05	1.165 E-06	2.942 E-08
0.4	2.938 E-02	3.048 E-03	2.710 E-04	2.127 E-05	1.562 E-06
0.6	5.174 E-02	7.917 E-03	1.059 E-03	1.317 E-04	1.525 E-05
0.8	7.558 E-02	1.507 E-02	2.622 E-03	4.329 E-04	6.850 E-05
1.0	9.745 E-02	2.377 E-02	5.082 E-03	1.044 E-03	2.050 E-04

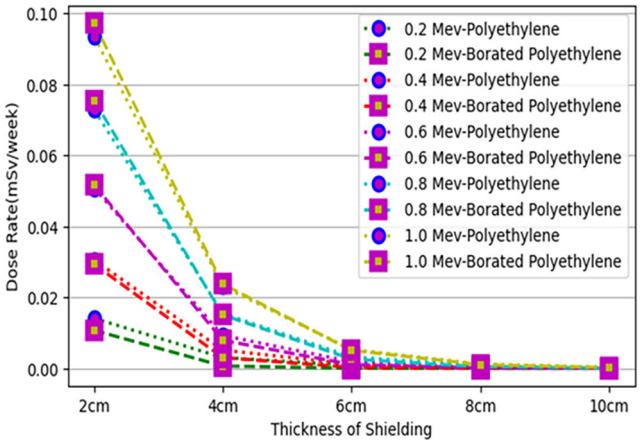

Fig. 2. Comparison of radiation dose rates after shielding for neutron rays at different energy levels

중성자의 에너지가 0.6 MeV인 경우는 2 cm 두께의 결과에서 Polyethylene의 선량률 5.087E-02 mSv/week에 대해 5.174E-02 mSv/week의 결과로 앞에서의 0.2-4 MeV 그래프와는 반대로, Borated Polyethylene 차폐체의 투과 방사선량률이 Polyethylene 차폐체보다 높은 경향을 나타내었다. 또한, 이러한 경향은 4 cm의 두께부터 다시 반전되어 Borated Polyethylene 차폐체의 투과 방사선량률이 Polyethylene 차폐체보다 낮은 결과를 나타내었다. 이는 2 cm 두께에서 Borated Polyethylene 차폐체의 차폐 성능이Polyethylene 차폐체보다 낮았다는 것을 의미하며, 기존의 예상과는 달리 두께에 따른 차폐율의 차이를 확인할 수 있다.

계속하여 중성자의 에너지가 0.8 MeV일 때, 해당 결과는 0.6 MeV 그래프와 비슷한 양상이었다. 2 cm 두께로 차폐하였을 경우 Borated Polyethylene 차폐체의 투과 방사선량률이 7.558E-02 mSv/week으로 Polyethylene 차폐체에서의 선량률 7.297E-02 mSv/week보다 높았으며, 4 cm 두께부터 이러한 경향이 반전되었다. 또한, 차폐율의 감소 폭의 차이는 더욱 근소해졌다.

마지막으로 중성자의 에너지가 1.0 MeV일 때 0.6, 0.8 MeV 그래프와 비슷한 경향을 나타내었지만, 2 cm 두께 뿐만 아니라 4 cm 두께까지 각 9.745E-02, 2.377E-02 mSv/week의 값으로 Polyethylene 차폐체의 투과된 방사선량률 9.362E-02, 2.308E-02 mSv/week 보다 더 높았다.

전체적으로는 에너지가 높아질수록 두 차폐체 간의 차폐율 감소 폭이 미미해지며 차폐효과의 차이가 작아지는 양상을 확인할 수 있었다. 이와 같은 실험 데이터를 통하여 붕소 물질의 차폐재

로써의 흡수를 통한 차폐효과를 확인해볼 수 있었다.

4. 고찰 및 결론

중성자선속이 어떤 매질 내를 통과할 때 해당 매질의 원자핵과의 상호작용, 충돌과정을 통해 산란과 흡수반응으로 강도가 감쇠된다[10]. 산란은 산란 후의 일부 잔여 선속이 존재하므로 엄밀히는 흡수반응에만 국한된다. 고속중성자선은 수소 원자와 탄성충돌 할 때, 가장 에너지 손실이 크기 때문에 고속중성자의 차폐에는 주로 수소 함량이 높은 물질이 많이 사용되며 본 연구에서는 폴리에틸렌을 이용한 차폐체를 선택하였다.

또한 boron이 함유된 차폐체는 중성자에 대해 높은 흡수단면적을 갖고 있어 흡수체로 좋은 재료이며, 기존의 연구를 통해 중성자선 감쇠율의 효과에 대한 입증 역시 되어 있다. 따라서 실험에 앞서 중성자선을 차폐하기 위한 효과적인 재료는 수소를 이용한 폴리에틸렌의 산란과정과 붕소를 함유하여 흡수과정이 복합적으로 일어나 감쇠시키는 Borated Polyethylene 차폐체가 될 것으로 생각하였다.

그러나 본 실험 데이터에서도 알 수 있듯이 0.6, 0.8 MeV 중성자선에 대해 2 cm 두께로 차폐했을 때와 1.0 MeV 중성자선에 대해 2, 4 cm 두께로 차폐했을 때 Borated Polyethylene 차폐체의 차폐율이 Polyethylene 차폐체에 반전되었다. 또한 0.6, 0.8 MeV의 경우는 4 cm 이상의 두께로, 1.0 MeV의 경우는 6 cm 이상의 두께로 차폐했을 때 차폐효과가 다시 커졌다.

따라서 특정 에너지 범위에서 Borated Polyethylene 차폐체로 더 좋은 효과를 얻기 위해서는 두께가 증가한 4, 6 cm 이상의 범위로 설계했을 경우 가능하다는 것을 알 수 있으며 이러한 부분 역시 효과의 차이는 상당히 근소하다.

결과적으로 저에너지 중성자는 흡수반응을 이용하여 효과적으로 감쇠가 가능하지만, 고에너지 중성자의 감쇠는 감속과 흡수가 이루어져야 한다. 이때, 산란단면적이 커야 효과적으로 감속이 되며 차폐체 내로 흡수될 수 있다. 차폐하고자 하는 중성자의 에너지 범위에 따라 Borated Polyethylene 차폐체가 Polyethylene 차폐체보다 항상 좋은 성능을 발휘하는 것은 아니며, 해당 에너지 범위가 커지면 유의미한 선속 감소 차이가 줄어든다. 이어서 boron이라는 흡수에 효과적인 재료를 실험하였을 때 차폐재로서 좋은 성능을 발휘할 수 있는 에너지 범위가 존재한다는 것을 확인하였다. 따라서 같은 재료로 다양한 에너지 범위의 중성자를 차폐하려 한다면 이와 같은 한계가 있다는 점을 고려하여 다양한 타입의 재료 조합을 구상하거나 여러 종류의 차폐체를 다중으로 차폐하는 방식을 통해 해소할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2024년도 남부대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음(This study was supported (in part) by research funds from Nambu University, 2024).

참고문헌

1. https://npp.khnp.co.kr/index.khnp?menuCd=DOM_000000102002001001.
2. Min JY, Lee BN, Lee JS and Lee JH. 2016. Neutron Shielding Performance of Mortar Containing Synthetic High Polymers and Boron Carbide. *J. Korea Concr. Inst.* **28**(2):197-204. https://doi.org/10.4334/JKCI.2016.28.2.197.
3. Park JY, Jee HS and Bae SC. 2018. Evaluation of Neutron Shielding Performance of Polyethylene Coated Boron Carbide-Incorporated Cement Paste using MCNP Simulation. *J. Korea Inst. Build. Constr.* **18**(2):114-115. UCI:I410-ECN-0102-2019-500-001446160.
4. Lee JC and Kim WJ. 2017. Mechanical Properties and Neutron Shielding Performance of Concrete with Amorphous Boron Steel Fiber. *J. Korea Inst. Build. Constr.* **17**(1):9-14. https://doi.org/ 10.5345/JKIBC.2017.17.1.009.
5. Jung JY, Yoon DK, Suh TS, Han SM and Jang HS. 2014. Preliminary Study for Imaging of Therapy Region from Boron Neutron Capture Therapy. *J. Korea Prog. Med. Phys.* **25**(3):151-156. http://dx.doi.org/10.14316/pmp.2014.25.3.151.
6. Hong HS. 2014. A Study on comparison of resolution according to filter material and Calculation of the Radiation Dose of X-ray generator using MCNPX code. The Graduate School of Myongji University.
7. James EB. 2011. Characterization of a Boron Carbide Heterojunction Neutron Detector. Air Force Institute of Technology. https://scholar.afit.edu/etd/1441.
8. Shultis JK. et al. (2004-2011). “AN MCNP PRIMER”, Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering, Univ. Manhattan.
9. ICRP. 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation.
10. Park BG. 2013. Study on an analytical method for the light element depth profiling based on cold neutron capture reactions. The Graduate School of Seoul University. https://doi.org/10.23170/snu.000000013647.11032.0000385.